

Utilização de Análise Estatística e Modelagem Numérica na Previsão de Recalques de Estacas na Carga de Trabalho

Alexsander Silva Mucheti

Doutorando e Engenheiro Geotécnico, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp e ZF & Engenheiros Associados S/S, São Paulo, Brasil, alexmucheti@gmail.com

Luiz Felipe Goulart Fiscina

Mestrando, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, Brasil, luizfiscina@gmail.com

Yuri Barbosa

Doutorando, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, Brasil, ybarbosa39@gmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque

Professor Doutor, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: O presente trabalho tem o objetivo de avaliar o recalque de estacas tipo hélice contínua na carga de trabalho, por meio de doze provas de carga estáticas executadas na cidade de Santo André, Região Metropolitana da cidade de São Paulo, Brasil. Os ensaios foram realizados em seis estacas de diâmetro 40 cm, três de 50 cm e três de 60 cm, comprimentos entre 15 e 17 m. Com base em uma investigação geotécnica composta por 29 ensaios SPT's, determinou-se os valores de N_{SPT} representativos para cada metro de ensaio a partir de intervalos estatísticos com nível de confiança igual a 95% segundo a distribuição estatística “t” de Student. Fundamentados nesses valores e em correlações empíricas disponíveis na literatura, determinaram-se os parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos. A determinação dos deslocamentos na carga de trabalho foi realizada através de métodos de elementos finitos pelo software Geostudio 2012, módulo Sigma/W. Os resultados mostraram um grande potencial nas estimativas de recalques em estacas, uma vez que os métodos teóricos disponíveis na literatura resultam em grande variabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Tipo Hélice Contínua, Prova de Carga Estática, Recalque, Análise Estatística, Elementos Finitos.

ABSTRACT: The present work has the objective of evaluating the settlements of continuous flight auger piles in the workload, through twelve static load tests performed in the city of Santo André, Metropolitan Region of the city of São Paulo, Brazil. The tests were carried out on six 40 cm diameter piles, three 50 cm and three 60 cm, lengths between 15 and 17 m. Based on a geotechnical investigation composed of 29 SPT's tests, the representative NSPT values for each meter were determined from statistical intervals with a 95% confidence level according to the Student's “t” statistical distribution. According to these values and empirical correlations available in the literature, soil resistance and deformability parameters were determined. The determination of displacements in the workload was checked using finite element methods using the Geostudio 2012 software, module Sigma/W. The results showed great potential in the estimation of settlements in piles since the theoretical methods available in the literature outcome great variability.

KEYWORDS: Continuous Flight Auger, Static Load Test, Settlement, Statistic, Settlement, Statistical Analysis, Finite Element.

1 Introdução

A sofisticação dos problemas com que o engenheiro geotécnico tem se deparado nas últimas décadas, apresentam exigências de respostas exponencialmente mais complexas com relação àquelas que era preciso gerar no passado, apresentando-se para a ciência e para a comunidade científica um desafio: a necessidade de

obtenção de respostas cada vez mais sofisticadas para tratar tais complexidades, em tempo sucessivamente menor e por meio de solução de problemas complexos.

Todo cálculo em engenharia está sujeito a incertezas, já que nenhum modelo descreve perfeitamente a realidade e está susceptível a erros de diversas espécies. No entanto, em se tratando de geotecnia, as incertezas podem ser ainda maiores, tratando-se do material solo.

Com base na fenomenologia dos problemas que envolvem a variabilidade dos solos, a recente ABNT NBR 6122/2019 reconheceu “que a engenharia geotécnica não é uma ciência exata e que riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva fenômenos ou materiais da natureza”, assim, afim de atuar no equilíbrio racional desta complexidade, o tratamento estatístico de investigações geotécnicas torna-se imprescindível, pois sabe-se que a variabilidade de resultados se tratando de solo é frequente.

Segundo Aoki (2018) diversos fatores condicionam o risco geotécnico de uma fundação, entre eles: as variadas propriedades reológicas dos materiais componentes, as diferentes geometrias dos modelos estruturais, o tempo de recorrência das cargas atuantes e suas diversas combinações, os variados modelos de interação solo-estrutura para encontrar as solicitações decorrentes das ações das carga atuantes na fase de execução e durante a vida útil da obra, a diferença das metodologias construtivas, além dos métodos de instalação e controle da execução.

Assim, dando continuidade ao trabalho de Mucheti et al. (2018), objetiva-se avaliar no presente trabalho o recalque de estacas tipo hélice contínua na carga de trabalho, através de análise estatística de dados e modelagem numérica, em contradição aos imprecisos métodos analíticos ainda utilizados.

2. Geologia local

A geologia da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), é representada por três grandes compartimentos sendo, em ordem estratigráfica, o embasamento pré-cambriano, os sedimentos paleógenos a neógenos (anteriormente denominados como terciários) da Bacia de São Paulo e as coberturas quaternárias (Negro et al., 2012).

O local do estudo situa-se às margens do rio Tamanduateí, no bairro de Utinga, cidade de Santo André, estado de São Paulo, sobre um embasamento pré-cambriano.

O Rio Tamanduateí nasce na cidade de Mauá, no atual Parque Ecológico Gruta Santa Luzia, na região da Serra do Mar. Em seu percurso de 35 quilômetros passa pelas cidades de Mauá, Santo André, São Caetano do Sul e deságua no Rio Tiete, na cidade de São Paulo. No fim do século XIX, esse rio era um dos pontos de lazer da capital paulista e era utilizado para transporte fluvial. Na região das atuais Rua 25 de Março e Ladeira Porto Geral, existiam jardins com quiosques que serviam bebidas e comidas, uma casa de banho e espaço para descanso, conhecido como Ilha dos Amores, além dos mercados, como o Mercado Grande, que eram atendidos pelo transporte fluvial. Devido a inúmeras inundações, essas edificações foram abandonadas com o decorrer do tempo (Linder, 2014).

Os depósitos aluvionares do Rio Tamanduateí são predominantemente compostos por sedimentos quaternários formados por areias, argilas e conglomerados. Estes depósitos estão sobre a Formação Resende, da Bacia Sedimentar de São Paulo (Gouveia, 2010).

A Formação Resende, de idade eocênica-oligocênica, é constituída por um sistema de leques aluvias associados a rios entrelaçados (Riccomini et al., 2004). Na porção próxima dos leques aluviais pode-se encontrar conglomerados polimíticos interdigitados com arenitos e lamitos arenosos (Gurgueira, 2013). Já nas porções distais, associadas com os rios entrelaçados, se encontra arenitos intercalados com lamitos. Sendo que os depósitos basais da Bacia de São Paulo podem chegar a 80% do preenchimento sedimentar da mesma (Riccomini e Coimbra, 1992).

3 Investigações geotécnicas

De modo geral a estratigrafia do subsolo é composta inicialmente por uma camada superficial de 3,0 m de aterro de entulho com solos diversos e escória de alto forno (um subproduto resultante da fusão do minério de ferro em ferro gusa, substratos bastante comuns nas indústrias da região). Para

que as sondagens pudessem ser executadas, foi necessário escavar e remover esta camada de resíduos e, conseqüentemente, os relatórios de sondagem não computaram o índice de resistência a penetração (N_{SPT}) dos metros iniciais. Em seguida, uma camada de argila siltosa orgânica de consistência muito mole e mole, de espessuras variáveis, prolongando-se até 8,5 m de profundidade. Posteriormente, camadas de areia siltosa e argila silto arenosa intercalam-se de ordens e espessuras variáveis até a cota limite do ensaio SPT. Pode-se observar na Figura 1, de forma agrupada, o índice de resistência (N_{SPT}) e o coeficiente de variação (CV) ao longo da profundidade.

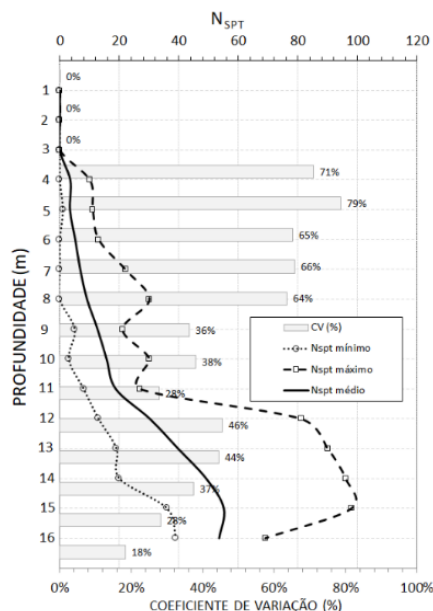


Figura 1 - Índice de resistência N_{SPT} e variação do índice de resistência N_{SPT}

4 Localização das provas de carga

A Figura 2 apresenta o posicionamento das provas de carga estáticas (PCEs) e a localização das sondagens SPT distribuídas no terreno do empreendimento.

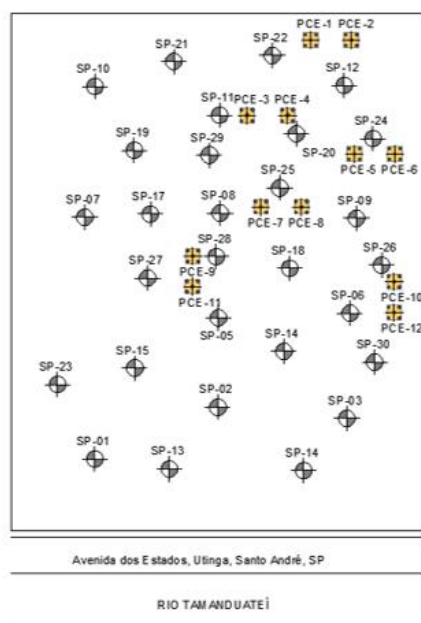


Figura 2 – Posicionamento das sondagens e provas de carga.

5 Provas de carga estática

As provas de carga estáticas foram realizadas de acordo com a ABNT NBR13.131/2006, no período de dezembro/2017 a janeiro/2018. Informações sobre as características das estacas ensaiadas, a carga máxima atingida em cada ensaio, os deslocamentos obtidos na carga de trabalho, ao fim do carregamento e ao fim do descarregamento (carregamento residual) são apresentados na Tabela 1. Detalhes acerca do comportamento da curva carga-recalque encontra-se em Mucheti et al. (2018).

Tabela 1 - Dados das estacas ensaiadas

Ensaio	ϕ (cm)	Comprimento (m)	$Q_{\text{trab.}}$ (kN)	Q_{ensaio} (kN)	Desloc. máximo (mm)	Desloc. residual (mm)	Desloc. Q_{trab} (mm)
PCE01	50	17,0	1.150	2.305	17,90	13,12	2,45
PCE02	40	16,0	700	1.542	5,95	2,24	1,38
PCE03	40	15,0	700	1.403	7,03*	N/A*	1,71
PCE04	50	16,0	1.150	2.292	9,30**	2,77**	5,05
PCE05	40	15,0	700	1.403	5,56	2,27	1,28
PCE06	60	17,0	1.600	3.208	13,26	5,26	3,24
PCE07	40	15,0	700	1.403	9,56	4,30	2,24
PCE08	60	17,0	1.600	3.204	12,63	5,13	3,35
PCE09	60	17,0	1.600	3.211	9,69***	N/A***	3,03
PCE10	50	17,0	1.150	2.309	13,51	8,00	3,29
PCE11	40	15,0	700	1.404	6,90	2,12	2,10
PCE12	40	16,0	700	1.401	5,76	2,17	1,62

Nota: * PCE-03 rompeu o bloco, estruturalmente, no 10° estágio, sem possibilidade de descarregar; ** PCE-04 rompeu o bloco, estruturalmente, no 10° estágio, mas foi possível descarregar; *** PCE-09 rompeu o bloco, ou a estaca teste, estruturalmente no 10° estágio, sem possibilidade de descarregar.

6 Análise estatística

Com o objetivo de avaliar o ensaio SPT que melhor caracteriza a região do empreendimento foi executada uma análise estatística inferencial, isto é, a utilização de uma ou várias amostras de um dado parâmetro, nesse caso específico o valor de N_{SPT} desenvolvido em cada camada de solo com espessura igual a 1,0 m, de tal forma que essa informação possa ser expandida para toda a população. Com isso, foi criado um intervalo de confiança (IC) com um nível de confiança (γ) igual a 95% construído com base na distribuição de probabilidade “t” de Student.

Esse tipo de distribuição é indicada quando se deseja obter a média (μ) de uma população com base em uma única amostra onde o número de pontos amostrais (n) seja pequeno, usualmente não superior a 40, e para amostras que seguem uma distribuição Normal de probabilidade (Montgomery e Runger, 2014). Além disso, segundo esses autores, é necessário conhecer o desvio padrão (σ) e a média (\bar{X}) da amostra para se calcular a margem de erro do IC, ou seja, os limites máximos e mínimos que possam conter a média da população com um dado nível de confiança.

Para a verificação da normalidade dos dados de N_{SPT} para cada camada, aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, o qual utiliza uma análise estatística sobre a maior diferença entre a curva Normal cumulativa teórica e a obtida nos histogramas dos dados amostrais (Massey, 1951). O teste foi aplicado com o auxílio do software MATLAB a partir da função *ktest*. O teste retorna dois valores de h . Se h for igual a 1 o teste foi reprovado, caso contrário ($h=0$) os dados seguem uma distribuição Normal de probabilidade.

De uma maneira geral, a distribuição dos valores de N_{SPT} em cada camada (29 valores para cada metro de ensaio) resultou em um $h=0$, exceto a camada representativa da cota -5,0 ms. Sendo assim, é razoável inferir

que os valores de N_{SPT} seguem uma distribuição Normal quando analisados de forma horizontal no terreno para cada camada representativa do ensaio SPT.

A margem de erro foi calculada por meio da função do software Excel: $INT.CONFIANÇA.T(1-\gamma;\sigma;n)$. Posteriormente, foi plotado o intervalo de confiança de N_{SPT} para cada metro representativo do ensaio como pode ser observado na Figura 3.

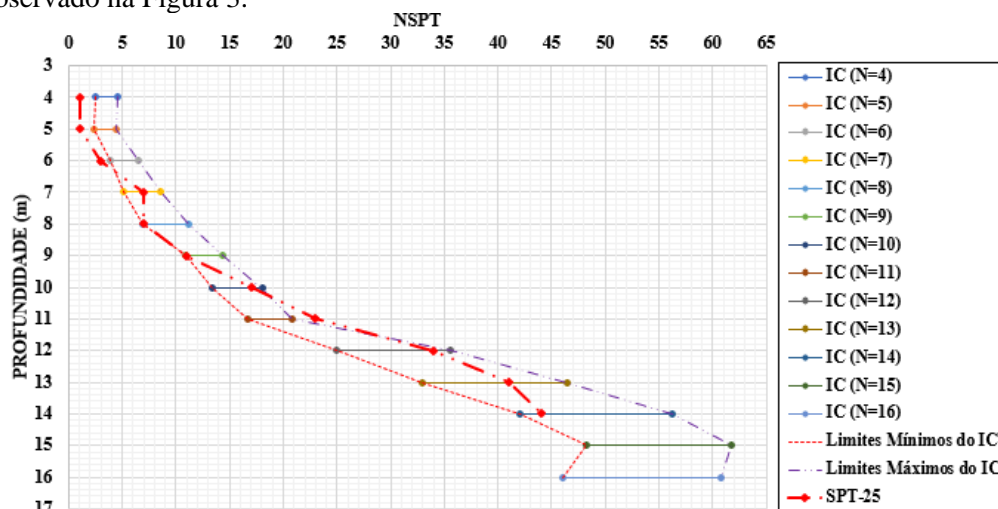


Figura 3 – IC ($\gamma=95\%$) de N_{SPT} para cada metro representativo do ensaio SPT

Finalmente, foi estudado qual ensaio SPT dentre os 29 executados possuiu o maior número de valores N_{SPT} dentro dos intervalos de confiança de cada metro. De um total de 13 valores de N_{SPT} registrados em profundidade (excluindo os valores dos 3 metros iniciais referentes à escavação do aterro), o SPT-25 registrou 7 valores dentro da faixa de IC e foi escolhido como o ensaio representativo para a obtenção dos parâmetros geotécnicos para a simulação numérica (Figura 3).

7 Parâmetros geotécnicos

Com base no estudo estatístico das 29 sondagens disponíveis definiu-se a sondagem de maior nível de confiança (SP-25) dentro do intervalo de confiança considerado. A partir desta, os parâmetros geotécnicos de resistência e deformabilidade dos solos foram determinados, Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros geotécnicos

Prof. (m)	N_{SPT}	Solo	ϕ (°)	C_u (kPa)	E (MPa)	γ (kN/m ³)
1	0	Aterro	15	0	12,7	17
2	0	Aterro	15	0	12,7	17
3	0	Aterro	15	0	12,7	17
4	1	Argila orgânica	19,5	10	13,9	11
5	1	Argila orgânica	19,5	10	13,9	11
6	3	Argila siltosa	22,7	30	16,2	19
7	7	Areia fina	26,8	70	20,9	19
8	7	Areia fina	26,8	70	20,9	19
9	11	Argila silto arenosa	29,8	110	25,6	19,5
10	17	Argila silto arenosa	33,4	170	32,6	19,5
11	23	Argila silto arenosa	36,4	230	39,6	19,5
12	34	Argila silto arenosa	41,1	340	52,4	19,5
13	41	Argila silto arenosa	43,6	410	60,6	19,5
14	41	Argila silto arenosa	44,7	440	64,1	19,5

Nota: ϕ – ângulo de atrito (Teixeira, 1996); C_u – coesão não drenada (Teixeira e Godoy, 1996); E – módulo de deformabilidade (Trofimenkov, 1974); γ – peso específico do solo (Joppert, 2007)

8. Resultados e discussões da análise computacional

A determinação dos deslocamentos na carga de trabalho foi verificada através do método de elementos finitos pelo software Geostudio 2012, módulo Sigma/W. O trabalho numérico consistiu-se em uma modelagem axissimétrica, dividida em três etapas: perfuração, concretagem e carregamento por etapas (uma simulação dos acréscimos de carga realizados durante a prova de carga estática).

A Figura 4 a seguir exibe os detalhes do trabalho computacional com o método dos elementos finitos, a escala ampliada da distorção fidedigna da malha bosquejada sobre o conjunto solo-estaca e o diagrama de transferência de carga com base nos acréscimos de carga.

Por último, a Figura 5 ilustra o gráfico carga *vs* deslocamento das provas de carga PCE 1 e PCE 10 correspondentes as estacas de diâmetro igual a 50 cm e 17,0 m de profundidade. Ainda neste gráfico, indica-se a o comportamento carga *vs* deslocamento resultante da modelagem computacional. Para as demais provas de carga os resultados estão descritos na Tabela 3.

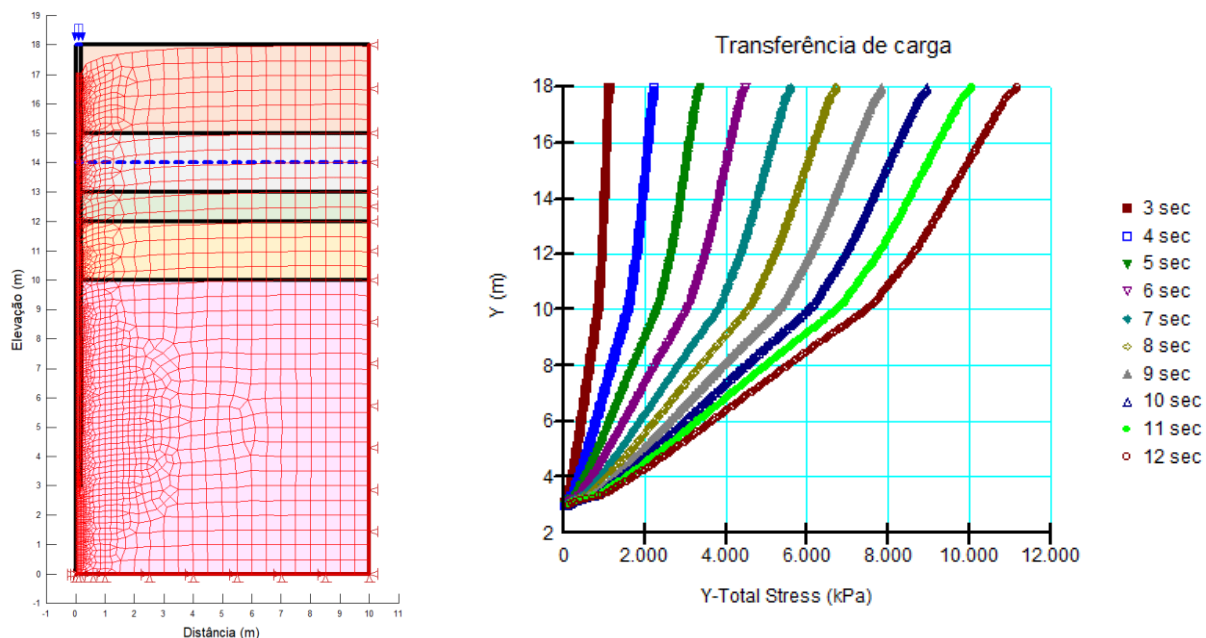


Figura 4 – Modelagem computacional, detalhes.

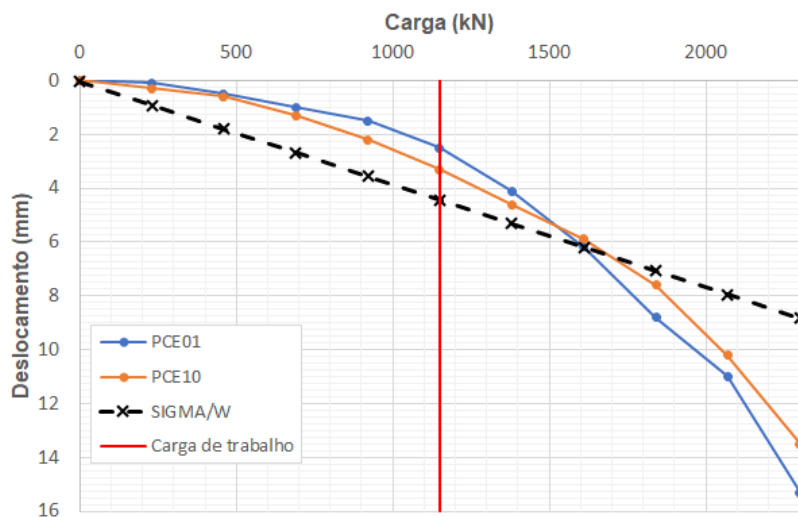


Figura 5 – Carga *vs* deslocamento da prova de carga estática e carga *x* deslocamento da modelagem computacional.

Tabela 3 – Deslocamentos da prova de carga estática e deslocamentos da modelagem computacional.

PCE	Ø (cm)	Comprim. (m)	Carga trab. (kN)	Carga PC. (kN)	Desloc. Carga. trab. (kN)	Desloc. PC (mm)	Deslocamento SIGMA(mm)	
							Carga trab.	PC
01	50	17	1.150	2.305	2,5	15,3	4,44	8,82
02	40	16	700	1.542	1,4	4,5	3,59	7,19
03	40	15	700	1.403	1,7	7,0	3,73	7,46
04	50	16	1.150	2.292	2,8	9,3	4,67	9,28
05	40	15	700	1.403	1,3	5,5	3,73	7,46
06	60	17	1.600	3.208	3,2	13,3	5,38	10,76
07	40	15	700	1.403	2,2	9,6	3,73	7,46
08	60	17	1.600	3.204	3,4	12,6	5,38	10,76
09	60	17	1.600	3.211	3,0	9,7	5,38	10,76
10	50	17	1.150	2.309	3,3	13,5	4,44	8,82
11	40	15	700	1.404	2,1	6,9	3,73	7,46
12	40	16	700	1.401	1,6	5,8	3,59	7,19

As estacas de diâmetro 40 cm e comprimento de 15,0 m (PCE03, 05, 07 e 11) tiveram recalques na carga de trabalho da ordem de 1,8 mm contra 3,73 mm obtido na modelagem (variação de 104%), as de comprimento igual a 16,0 m (PCE02 e 12) deslocaram 1,5 mm contra 3,59 mm (variação de 140%). A estaca de diâmetro 50 cm e 16,0 m de comprimento (PCE 04) atingiu 2,8 mm contra 4,67 mm (variação de 67%), já as de 17 m (PCE01 e 10) deslocaram 2,9 mm contra 4,44 mm (variação de 53%). As estacas de diâmetro 60 cm e comprimento de 17,0 m (PCE06, 08 e 09) recalçaram 3,2 mm contra 5,38 mm (variação de 68%). Percentualmente um valor alto, porém os deslocamentos obtidos pela modelagem enquadram-se dentro de valores aceitáveis se tratando das estacas na condição de trabalho.

9. Conclusões

A análise estatística mostrou-se de suma importância na determinação do ensaio SPT de maior nível de confiança dentro dos intervalos de confiança considerados. Dentre os 29 ensaios executados, a sondagem SPT-25 foi a que apresentou o maior número de valores N_{SPT} dentro dos ICs calculados para cada metro do ensaio. Sendo assim, foi a partir desse ensaio que os parâmetros geotécnicos foram estabelecidos para o trabalho numérico computacional.

Os deslocamentos atingidos na carga de trabalho das estacas foram de pequena magnitude da ordem média de 1,7 mm para as estacas de diâmetro 40 cm, 2,9 mm para as diâmetro 50 cm e 3,2 mm para as de diâmetro 60 cm. Os valores obtidos na modelagem numérica foram de 3,68 mm para as estacas de diâmetro 40 cm, 4,44 mm para as de diâmetro 50 cm e 5,38 para as de diâmetro 60 cm. De maneira geral, os resultados da modelagem foram 86 % superiores aos valores mensurados nas provas de carga, porém, os valores obtidos na modelagem justificam-se por serem de pequena ordem e, conseqüentemente, findam-se valores aceitáveis e procedentes de uma boa previsão, o que confirma a qualidade do trabalho numérico computacional.

O artigo traz a luz a importância de envolver a análise estatística nos trabalhos que rotineiramente são realizados com base apenas na análise pontual, ou seja, na sondagem de maior proximidade ou ainda baseado apenas na média amostral da população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). *NBR 6122 - Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Aoki, N. (2018). *Mini Curso: Aplicação de métodos probabilísticos em fundações*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador/BA.

- Gouveia, I. C. M. C. (2010). *Da originalidade do sítio urbano de São Paulo às formas antrópicas: aplicação da abordagem da Geomorfologia Antropogênica na Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí, na Região Metropolitana de São Paulo*. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo / USP, 363 p.
- Gurgueira, M. D. (2013) *Correlação de Dados Geológicos e Geotécnicos na Bacia de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo / USP, 76 p.
- Joppert Junior, I. (2007). *Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução*. São Paulo: Pini. P.99.
- Linder, L. (2014) *Ruas de SP tinham touradas, treinos de artilharia e força no século 19*. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/saopaulo/2014/06/1473214-ruas-de-sp-tinham-touradas-treinos-de-artilharia-e-forca-no-seculo-19.shtml>. Acesso em 23 de fevereiro de 2020.
- Massey Jr., Frank J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951.
- Montgomery, Douglas C.; RUNGER, George C. *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley and Sons, 2014.
- Mucheti, A.S.; Albuquerque, P. J. R.; Rodrigues, T. G. *Desempenho de estacas tipo hélice contínua monitorada na cidade de Santo André – SP*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador/BA
- Negro, A.; Namba, M.; Dyminski, A. S.; Sanches, V. L.; Korman, A. C. M. (2012) *Seminário Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba*, ABMS, D’Livros, São Paulo, 997 p.
- Riccomini, C. (1989) *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo / USP, 256 p.
- Riccomini, C.; Sant’anna, L. G.; Ferrari, A. L. (2004) *Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil*. Geologia do continente SulAmericano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, p. 383-405.
- Teixeira, A. H. (1996). *Projeto e execução de fundações*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3, SEFE 3. São Paulo: [s.n.], 1996. v. 1. p. 33-50.
- Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. (1996). *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: Hachich et al. (eds). *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini. p. 227-264.
- Trofimenkov, J. G. (1974). Penetration Test in URSS – State-of-the-Art EUROPEAN SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 1., 1974, STOCKHOLM. Proceedings... Stockholm National Swedish Building Research, p. 147-154.